

特 集

転倒データベースの構築に基づく子どもの
転倒による傷害の予防北村 光司¹⁾西田 佳史²⁾

1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター

2) 東京工業大学

要 約

子どもの転倒による傷害は、子どもの事故の中でも最も多く発生する事故である。しかしながら、転倒による傷害を予防するためにコントロール可能な変数は限られており、主に注意喚起に留まっている。この要因の1つは、転倒を科学的に捉えることができず、転倒の理解が進んでいないためである。本研究では、転倒を科学的に理解するために、実際の子どもの転倒をデータ化した転倒データベースの構築と、そのデータベースに基づく傷害リスク評価に関する取り組みについて紹介する。

I はじめに

子どもの事故による傷害は、子どもの発達と関係しており、毎年同じように事故が発生している。14歳以下の子どもの事故による死亡者数は、年間約200人となっている¹⁾。また、東京消防庁²⁾によると、令和3年に事故によって12歳以下の子どもの救急搬送された件数は13,027件となっており、事故種別件数では、転倒によるものが3,535件と3割弱を占めており、最も多い。従来、子どもの傷害予防は保護者が注意して見守ることとされてきたが、四六時中見守ることはできず、また見守っていたとしても傷害を防ぐことは難しい。WHOの子どもの傷害予防に関するレポート³⁾でも、見守りは定義が曖昧で、その効果も十分に検証されていないことが指摘されており、見守りに頼らない科学的な傷害予防が重要である。

しかし、その中でも転倒は予防が難しい。高齢者の転倒に関しては、運動などによって筋力やバランス能力を維持させるといったアプローチが取られるが、子どもの場合、発達と密接関係して起きるため、同様のアプローチを取ることが難しい。そのため、転倒自体を防ぐのではなく、転倒による重症な傷害を予防するアプローチが

必要である。しかし、転倒による傷害の予防を科学的に行うためには、そもそも転倒の実態をデータに基づいて理解する必要がある、それができて初めて予防策を検討することが可能となる。

本稿では、子どもの傷害予防に関する基本的な考え方の紹介をした上で、子どもの転倒による傷害予防を目的に、転倒の実態を把握するための転倒データベースの構築と転倒による傷害の予防への活用について述べる。

II 子どもの傷害予防に対する考え方と子どもの転倒による傷害の予防

1. 子どもの傷害予防に対する考え方

子どもの事故による傷害は、発達と密接に関係して起きるため、大人の一般的な事故と異なり、本人が注意して予防することは難しい。また、子どもを見守る立場にある保護者などが注意していても予防は難しい。これらは、そもそも変えることが難しい要素で、変えたい対象である事故の件数や傷害の重症度を変えようとしているため難しいアプローチとなっている。

例えば、1歳は子どもが立てるようになる時期であるが、バランスを取る力がまだ不十分であり、転倒が多い

連絡先：国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター生活行動モデリング研究チーム 北村光司

〒135-0064 東京都江東区青海2-4-7

TEL：03-3599-8311 E-mail：k.kitamura@aist.go.jp

受理日：2023. 4. 7

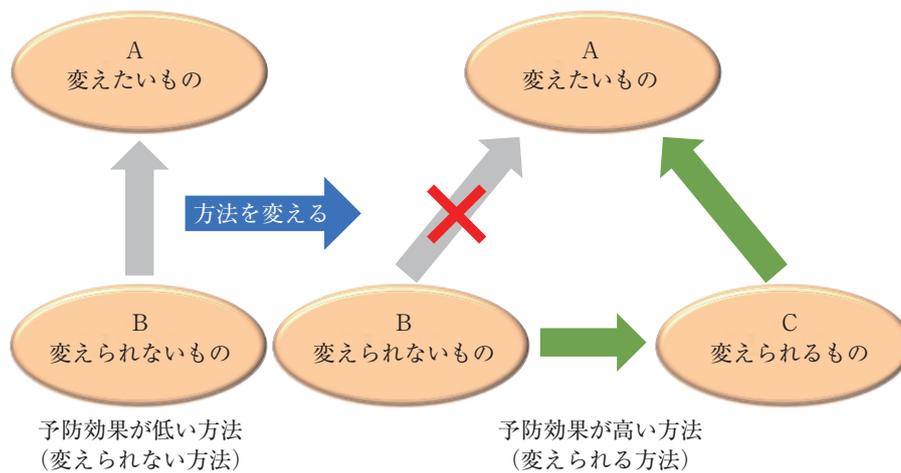


図1 予防効果が高い傷害予防の考え方

時期である。だからといって、子どものバランス能力を急に高めることは難しい。また、保護者が見守ることができる力にも限界があるため、もっと見守るように要求しても効果が低い。つまり、傷害予防を考える上で、変えたい対象に対して、「変えられるもの」で予防のアプローチを取っているか、という点は重要である。変えることが難しい傷害予防と、変えられる傷害予防の対比を図1に示す。図中の左側が、予防効果が低い、「変えられないもの」で予防しようとするアプローチを示したものである。図中の右側が、予防効果が高い、「変えられるもの」で予防をするアプローチである。これは一見すると当然のように思えるが、傷害に関わる要素をこの3種類に整理して考えられていない場合が多く、予防効果が低いアプローチが取られている。傷害予防では、「変えられるもの」を見つけることが重要であり、「変えられるもの」を検討することが可能なデータを整備することも重要である。

「変えられるもの」に関しては、傷害予防全般で用いられている3Eモデル、環境改善 (Environment)、教育 (Education)、法的規制 (Enforcement) の3つが参考になる。この3つのEの観点で、データに基づいて「変えられるもの」を検討することで具体的な予防策を考えることができる。この3つのEは並列ではなく、環境改善 (Environment) は人に依存しないことから、Passive approachと呼ばれ、もっとも予防効果が高いため、まず始めに検討すべきとされている。教育 (Education)、法的規制 (Enforcement) は、環境改善 (Environment) を推進するために活用したり、環境改善 (Environment) では対応ができない場合のアプローチとして検討する。

2. 子どもの転倒による傷害の予防

子どもの傷害予防に関する考え方をふまえて、子どもの転倒による傷害予防について考えてみたい。子どもの転倒事故は、主に、バランスを崩す、つまづく、滑るといった原因で発生する。このような転倒事故を環境改善によって予防しようとする、つまづくような段差をなくす、滑りやすい場所を滑りにくい素材に変える、といったことは可能であるが、バランスを崩さないように環境を変えることは難しく、玩具などのように移動させることが可能で床に置かれることがあり得るものによるつまづきなどまで予防することは難しい。

次に、転倒の結果発生する傷害は、主に、床や地面への接触、テーブルなどの家具への接触、手に持っていたものや身につけていたものとの接触といった原因で生じる。これらの傷害を予防したり、重症度を低減するには、床にクッションマットを敷いたり、家具の角にクッション材を取り付けたり、手に持ったり身につけるもの自体を柔らかいものにするなど、転倒によるエネルギーを和らげるアプローチが考えられる。このとき問題となるのが、転倒によってどのようなエネルギーが発生し、どの程度までそのエネルギーを低減することができれば、重症にならないのかを検討するためのデータがないことである。つまり、転倒した際に身体がどのような速度になっているのか、といったように科学的に理解することができない。そのため、予防策を科学的に検討することができないのである。

この問題に対し、著者らは子どもの自然な転倒に関するデータを収集し、データベースを構築する取り組みを行ってきた。また、そのデータベースを活用して、具体的な傷害予防に関する検討を行ってきたので、それについて紹介する。

Ⅲ 子どもの転倒データ計測および転倒データベースの構築

前節のとおり、子どもの転倒による傷害を予防するためには、子どもの転倒を科学的に理解可能にする転倒データベースが必要である。著者らはこれまでに子どもの行動観察システムを構築して、転倒に関するデータを収集し、データベースを構築してきた。本節では、行動計測システムについて紹介するとともに、転倒データベースについて紹介する。なお、行動計測システムについては、2010年当時のものであり、近年発展したRGBDカメラなどのセンサ技術やAI技術を活用すれば、より手軽なシステムを構築可能であると考えられる。

1. 行動計測システム

著者らは子どもの自然な転倒に関するデータを取得するための行動計測システムを構築した。行動計測システムは12台のビデオカメラ、子どもの身体に装着する加速度・ジャイロセンサ、およびそれらを記録するPCから構成される(図2)。カメラは部屋のすべての位置でステレオ視を確保するように配置した。なお、部屋全体を撮影するために魚眼レンズを装着したカメラを1台設置している。この計測システムの出力は以下のとおりである。

- ・加速度・ジャイロセンサデータ(サンプリング周期6ms):転倒検出に使用
- ・カメラ映像データ(12台,各30fps):転倒姿勢解析に使用

このシステムではPCでセンサデータを受信するごとにその瞬間の各カメラのフレーム番号をセンサデータの末尾に付加することで両データの同期を実現した。計測中の傷害事故発生防止のため、壁の角やドアの蝶番にはクッションカバーなどを取り付けた。

2. 行動計測システムを用いた計測および転倒に関するデータの取得

子どもの自然な転倒に関するデータを計測するために、行動計測システムを設置した部屋で1時間程度、子どもに遊んでもらう行動観察実験を行った。対象は転倒が多いと思われる歩き始めの年代とし、おおむね1~4歳の子どものとした。1回の計測あたり、2人の子どもの参加してもらった。実験では、まず子どもの属性(月齢、身長、体重)を記録し、子どもに加速度・ジャイロセンサが取り付けられたビブスを着てもらった。行動計測中は、部屋にあるおもちゃなどを用いて保護者と自由に遊んでもらう。本研究で扱う転倒は非意図的に発生した転倒であるため、故意に転倒させる実験は実施していない。

行動計測により子どもの行動データを得たら、加速度・ジャイロセンサデータに対して、図3に示す転倒検出アルゴリズムを用いて、転倒発生を検出し、それに対応する転倒映像を抽出する。子どもの転倒時の身体の動きは大人とは異なるため、加速度データに急激な変化が起きた場合を検出するような単純なアルゴリズムでは転倒を検出することはできない。転倒時のセンサデータを詳細に分析すると、転倒の特徴はセンサから得られる各

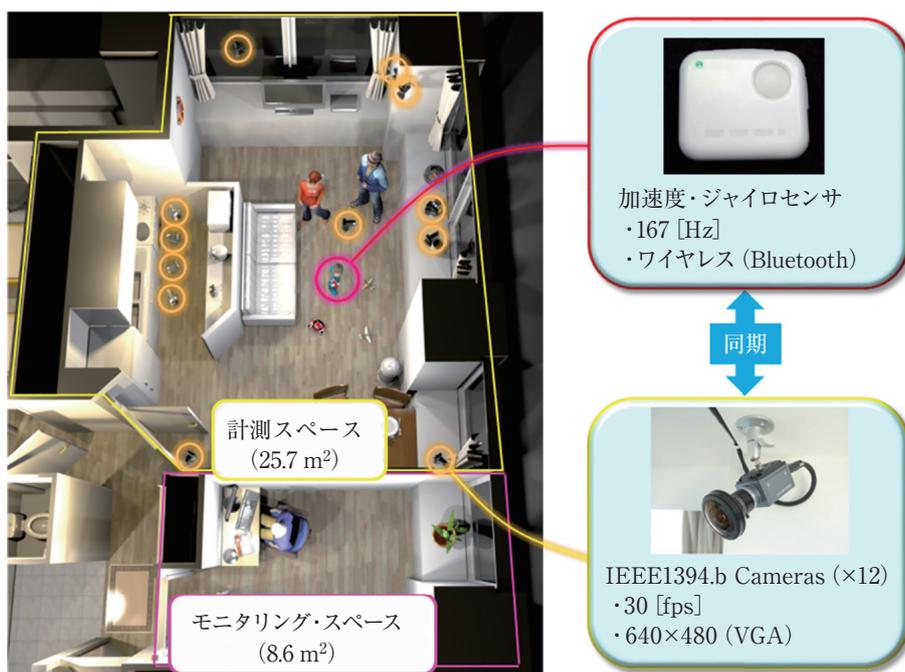


図2 行動計測システム

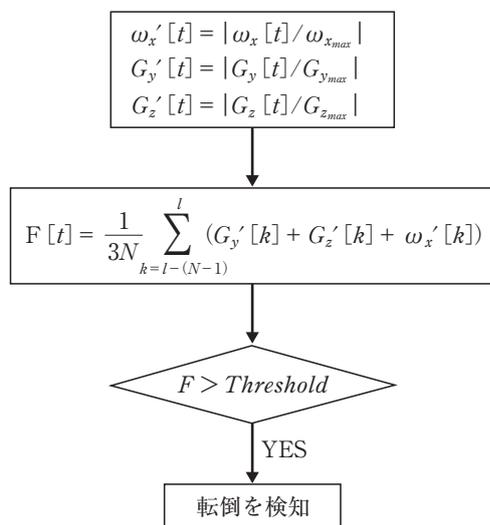


図3 転倒検知アルゴリズム

データで同時には表れない場合が多く、本研究ではこの影響を打ち消すために加速度や角速度の時間積算値を計算する手法を開発した。転倒時、センサデータには急激な値の変化がみられるが、特に G_y (身体の上方向の加速度)、 G_z (身体の前方向の加速度)、 ω_x (身体の前方向への回転の角速度) にその特徴がみられる。歩き始めの子どもの尻餅を突くような転倒の特徴は G_y に強く表れ、一方、身体が前に大きく投げ出されるような転倒の特徴は G_z や ω_x に強く表れる。また、転倒による各値の分布は転倒の仕方によって異なる。

これらの特徴を考慮し、上述の3種類のデータに表れた転倒の特徴量を加算して転倒の有無を判断するパラメータである転倒特徴強度 F を計算する。まず各データをセンサで得られる最大値で割ることで無次元化し、それらを足した上で最大値が1になるように正規化することで F を計算する。ただし、各データに転倒の特徴が表れるタイミングには最大で 200 [msec] 程度の差があるため、240 [msec] 間のデータを積算することで、3種類のデータに表れた転倒の特徴量を加算した指標を算出している。 F が閾値を超えたら転倒発生と判断し、センサデータの末尾に付加されている各カメラのその瞬間におけるフレーム番号を参照することで、前後2秒ずつの転倒映像を自動的に抽出する。

取得した転倒映像を用いて転倒動作解析を行い、転倒時の姿勢や速度、加速度のデータを得た。まず、複数箇所から同時に撮影された転倒映像に対して画像処理を行い、体軸を表す特徴点(頭頂点、耳珠点、首の付根、腹部中央)を抽出し、ステレオ視によって3次元位置を取得した上で転倒動作解析を行った。具体的には、取得した3次元位置情報から以下の変数の時間変化データを取

得した。

- ・頭部の速度 (鉛直方向, 合成速度)
- ・頭部の加速度 (鉛直方向, 合成加速度)
- ・頭部角度 (頭頂部 - 耳珠点 - 鉛直方向で構成される角度)
- ・体軸角度 (首の付根 - 腹部中央 - 鉛直方向で構成される角度)

3. 転倒データベースの構築

前述の行動計測システムを用いて、11か月～50か月の19人の子どもの行動計測を実施し、105回の転倒を計測した。105回の転倒に関して転倒動作解析を行い、取得したデータから構成される転倒データベースを構築した。具体的には、以下のデータから構成されるデータベースを構築することで、子どもの属性や転倒状況などで条件を絞って、転倒の特徴を把握することが可能である。

- ・子どもの属性データ：月齢、性別、歩行歴、身長、体重、利き手、利き足
- ・着地時のデータ：頭部速度 (鉛直方向, 合成)、頭部加速度 (鉛直方向, 合成)、体軸角度、頭部角度
- ・転倒継続時間 (転倒開始から終了までにかかった時間)
- ・転倒映像および転倒動作解析結果映像
- ・転倒モーションデータ
- ・転倒状況データ：着地部位、直前行動、転倒原因

構築した転倒データベースを検索し、その結果を可視化するソフトウェアを構築した (図4)。ソフトウェアでは、子どもの属性、着地部位、直前行動、転倒原因を条件に検索することが可能で、条件に合致した転倒に関するデータの一覧がテーブルとして表示され、転倒の速度、加速度、角度、転倒継続時間のヒストグラムまたは確率分布グラフが提示される。テーブルで表示された個々のデータには、転倒動画が紐づいており、転倒の様子を映像で確認することができる。また、転倒時の頭部速度の時間変化を可視化する機能もあり、図5に示すように、転倒が発生した周辺の空間を格子状のメッシュに切り、各要素に頭部が到達したときの速度を円錐で可視化する。円錐の向きは速度ベクトルの向きを表し、色と大きさは速度の大きさを表しており、青から赤になるにつれて速度が大きいことを表す。1件の転倒についてだけでなく、検索条件に合致した複数の転倒に関するデータを統合して可視化することも可能である。このように時空間的に、転倒速度の変化を把握することで、転倒時に衝突する対象物の高さや位置を考慮したリスクの検討が可能となる。

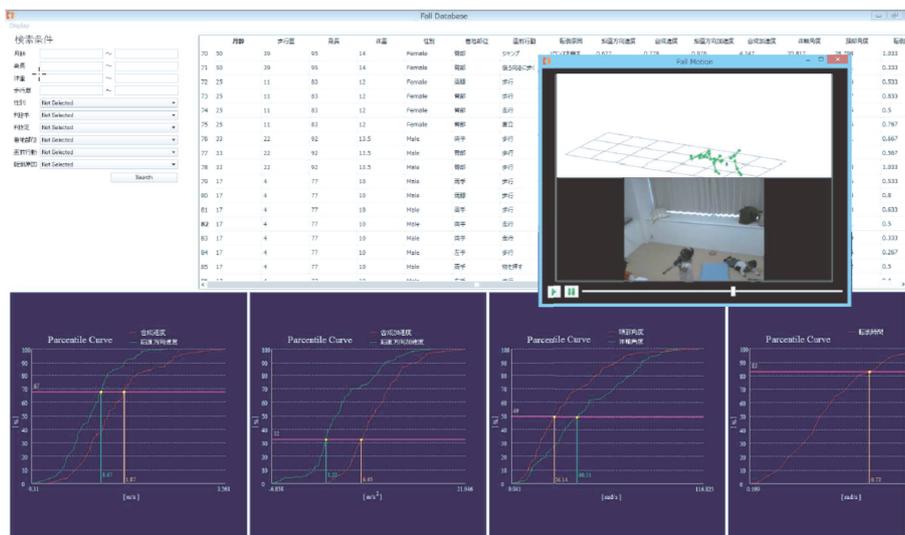


図4 転倒データベース検索ソフトウェア

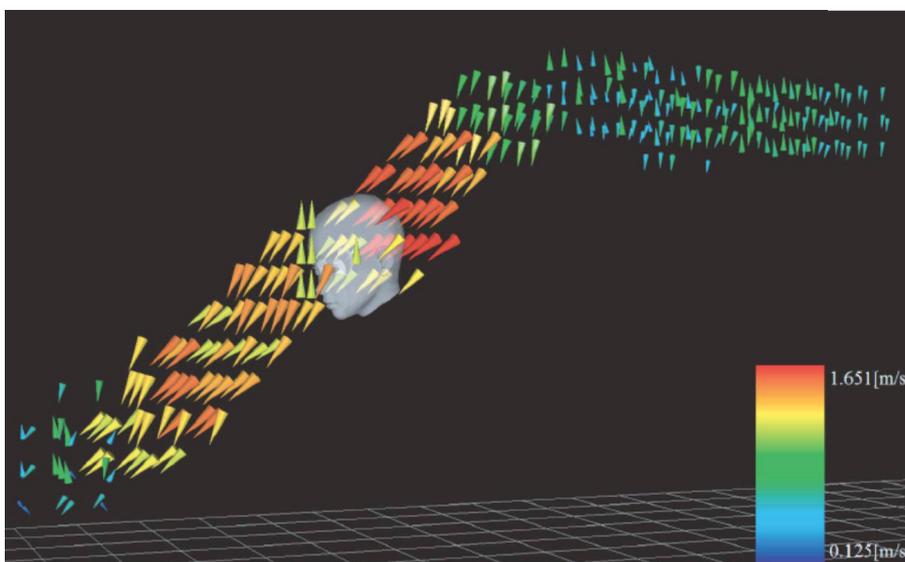


図5 頭部速度の時間変化の3次元的可視化

IV 転倒データベースを用いた転倒による傷害予防への活用

1. 転倒データベースと物理シミュレーションを用いたリスク評価

転倒データベースを用いて、子どもの転倒を科学的に捉えることができるため、転倒速度や方向の情報などを用いて物理シミュレーションを行うことで、例えば、頭部の傷害リスクを評価することが可能である。頭部の傷害リスクを評価する方法の1つとしてHIC（頭部障害基準）⁴⁾が広く活用されており、大人も含めた基準値としてはHIC 1000が用いられており、HICが1000を超えると、傷害が発生しない確率が0%となり、傷害による死亡の確率が0%ではなくなり、稀ではあるものの死亡する可能性が出てくる。また、約90%の確率で中程度の頭部損傷（頭蓋骨の骨折や、意識喪失を伴う顔の骨

折や深い切り傷など）が発生するとされている。

本研究では、転倒データベースから前方への転倒26例を抽出し、頭部が最も床面に近い状況での頭部速度を初速度として、マルチボディシミュレーションソフトウェアであるMadymoを用いて、床面の材質がコンクリートの場合をシミュレーションし、HICを算出した。得られたHIC値を元にパーセンタイル曲線にした結果を図6に示す。最大でもHICが300程度であり、重傷を負う可能性は低いことが分かる。

次に、床面への衝突ではなく、テーブルの角に頭部が衝突する状況を想定したシミュレーションを行った。転倒中全体で最も頭部速度が最大であった転倒を抽出し、そのときの床面からの高さ：55 cm、頭部速度：5.6 [m/s]、頭部進行方向：水平方向から45度下方を初期条件としてシミュレーションを行ったところ、HICは1371

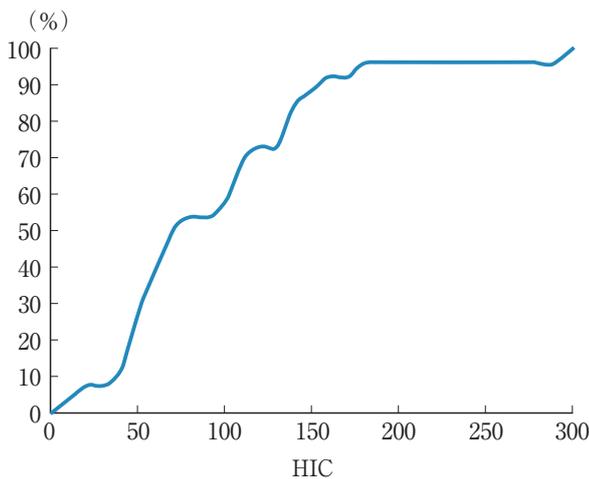


図6 コンクリート面への転倒時のHIC値のパーセンタイル曲線

となり、重傷を負う可能性があることが分かった。

このように、転倒データベースを用いた物理シミュレーションを行うことで、実態に基づいたリスクの見積もりが可能となり、予防策を具体的に検討することにつながる。

2. 転倒データベースを活用した転倒時の歯ブラシによる傷害リスクの検討

子どもの転倒事故では、身体を床面や家具などに接触することによる傷害だけでなく、転倒時に手に持っていたもので傷害を負うことがある。これまでに、箸、フォーク、綿あめの棒、棒付き飴の棒、歯ブラシなどを持っている際に転倒して、口腔内や喉に傷害を負った事故が報告されている。

例えば、歯ブラシによる事故に関して令和3年に消費者庁から発表された資料⁵⁾によると、平成28年4月から令和3年3月末までに6歳以下の事故情報が120件報告され、そのうち3歳以下の事故が104件であった。年齢別では、1歳児が最も多く48件、次いで2歳児が32件、3歳児が23件であり、3歳以下の子どもでも多く起きている。

歯ブラシの事故については、従来の予防策は、子どもに座って磨くようにさせる、といった注意喚起に留まっていた。しかし、子どもの転倒は一瞬目を離した際に発生するため、保護者が注意していても実際には予防が難しい。見守りのみによる予防の難しさを転倒データベースを用いて確認してみる。具体的には、転倒し始めてから、身体の一部が接地するまでの時間を分析(図7)すると、0.5秒程度が最も多いことが分かり、0.5秒間目を離すだけで転倒が発生するため、保護者の注意だけでは予防が難しいことが分かる。

転倒時の歯ブラシによる傷害を予防するためには、転

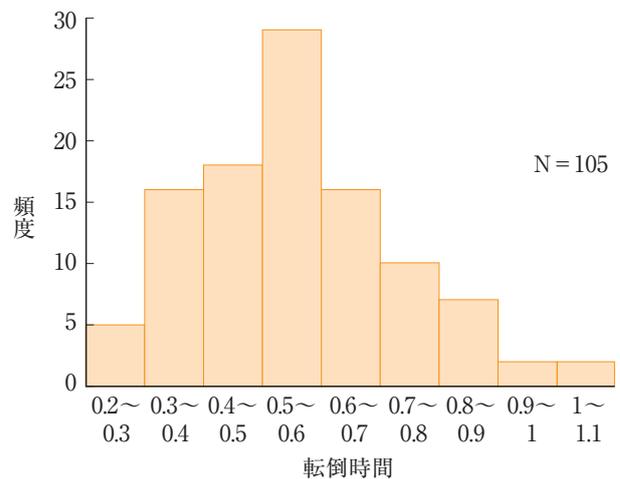


図7 転倒時間の分析結果(生後11~50か月合計105回の転倒)

倒自体ではなく、転倒しても重傷にならないように予防する必要がある。考えられるアプローチの1つは、歯ブラシが口腔内を傷つけないように、転倒によるエネルギーを歯ブラシが吸収することであるが、従来、転倒時に歯ブラシによってどのような力が発生しているかが不明だったため、どの程度の力を吸収する必要があるのかを工学的に検討することができなかった。これに対し、転倒データベースを活用することで、実際の転倒を反映したリスクの把握が可能である。

ここでは、一般的な歯ブラシ3種類(A1, A2, A3)、歯ブラシによる傷害予防を目的に開発されたネック部分が曲がる構造を持つ歯ブラシ1種類(B1)、歯ブラシ先端にゴム素材が取り付けられた歯ブラシ3種類(C1, C2, C3)に関して、転倒データベースを活用した落下試験によるリスク評価を行ったものについて紹介する。

このリスク評価では、1歳児と3歳児を対象とした評価を行うことを目的とし、それぞれの年齢の子どもが転倒した際に歯ブラシによってどのような力が発生するかと、口腔内を模した鶏肉(胸肉)に歯ブラシが突き刺さるかを、落下試験機を用いて確認した。落下試験では、上方に取り付けた頭部の重量の重りに歯ブラシを固定し、下方に荷重計とその上に口腔内を模した鶏肉を設置した。鶏肉に衝突する際に、転倒時の頭部速度となるように落下高さを設定し、歯ブラシを固定した重りを落下させ、鶏肉への突き刺さり状況と荷重を計測した。重りについては、自動車の安全性評価にも使われるダミー人形に採用されている各年齢の頭部重量、1歳児:2.64 kg、3歳児:2.72 kgを採用した。転倒時の頭部速度については、転倒データベースを用いて分析したところ、年齢と転倒速度に相関はみられなかったことから、年齢による区別はせず、転倒データベース全体の転倒速

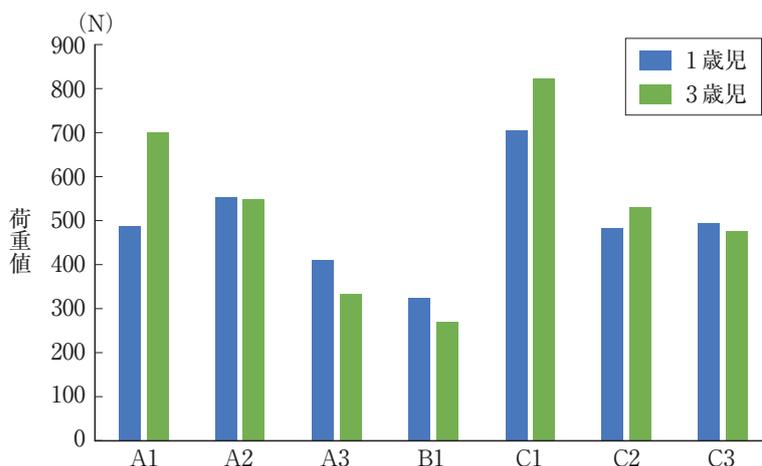


図8 落下試験結果

度の80パーセンタイル値である2.08 m/sとし、その速度を再現可能な落下高さ22.1 cmとして落下試験を実施した。

落下試験を各条件で3回ずつ行い、荷重値の平均値をまとめた結果を図8に示す。また、鶏肉への突き刺さりに関しては、B1以外の歯ブラシでは3回の試験すべてで突き刺さった。グラフから、傷害予防対策が取られたB1の歯ブラシが最も荷重値が小さいことが分かる。また、歯ブラシの先端にゴム素材をつけたC1～C3については、一般的な歯ブラシであるA1～A3と比べても荷重値に大きな違いがなく、鶏肉への突き刺さりもみられたことから先端にゴム素材を取り付ける対策では不十分であることが分かった。B1に関しては、歯ブラシが曲がることで衝撃を吸収するが、曲がり切った後にも歯ブラシと頭部を想定した重りによる荷重がかかるため、荷重値でみるとA3と近い値となっているが、歯ブラシが曲がることで接触面積が広くなり、応力としては小さくなるため、A3は突き刺さり、B1は突き刺さらなかったと考えられる。

以上のように、転倒データベースを活用することで、実態に即したリスク評価が可能となり、予防策の検討や予防策の効果評価が可能となる。

V おわりに

本研究では、子どもの転倒による傷害を対象にした予防アプローチを検討するために、子どもの転倒を科学的に扱えるようにする転倒データベースを構築し、転倒データベースを活用した物理シミュレーションや落下試験によって転倒による傷害リスクを評価した事例について紹介した。従来、子どもの転倒による傷害予防については、保護者などが気を付けることを促す注意喚起か、家具などの角にクッション材を取り付けるなどに留まっ

ていた。そのため、例えば、歯ブラシによって起きる傷害などでは、注意喚起に留まっており、「変えられないもの」で予防しようとする効果が低い予防策となっていた。これに対し、転倒データベースを構築することで転倒を科学的に扱うことが可能となり、「変えられる」変数を増やすことにつながった。

近年、センサ技術、IoT技術、AI技術の発展が目覚ましく、これまではデータ化することが難しかった日常生活が、科学的に扱えるようになってきており、これまでは「変えられる」変数となっていなかったものを、予防策に取り入れることが可能になってきている。そのため、転倒予防についても、これまでとは異なる新たなアプローチでの予防法が多く生み出されることに期待したい。

● 参考文献

- 1) 厚生労働省. 令和3年(2021)人口動態統計; 2021.
- 2) 東京消防庁. 令和3年中「救急搬送データから見る日常生活の事故」<https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/lfe/topics/nichijou/kkhdata/index.html>; 2021.
- 3) The World Health Organization. World Report on Child Injury Prevention; 2008.
- 4) Kleinberger, M. et al. Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems; National Highway Traffic Safety Administration, 1998.
- 5) 消費者庁. 子どもの歯磨き中の喉突き事故などに気を付けましょう! https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/caution/caution_050/assets/consumer_safety_cms204_210602_01.pdf; 2021.